

Wpływ cementacji na zachowanie się gruntów pod fundamentami budynków w trakcie trzęsienia ziemi

Effects of cement grouting on seismic performance of building foundations

1. Wprowadzenie

W ostatnich dziesięcioleciach wzniesiono dużo budynków na gruntach wątpliwej jakości, co było spowodowane szybkim wzrostem urbanizacji. Spowodowało to wzrost zagrożenia w przypadku wystąpienia trzęsienia ziemi na tych terenach, zwłaszcza jeżeli nie zastosowano w trakcie budowy odpowiednich rozwiązań inżynierskich. Cementację stosuje się w celu poprawy sejsmicznego zachowania się fundamentów. Jako technika poprawy gruntu cementacja znajduje szereg zastosowań obejmujących tamy, tunele, fundamenty, kopalnie, wały przeciwpowodziowe, drogi wodne i tym podobne (1-5). Ten szereg zastosowań cementacji obejmuje także poprawę właściwości geomechanicznych gruntów, w wyniku zagęszczania.

Cementacja przyczynia się także do zmniejszenia przepuszczalności wody oraz skraplania pary, ułatwia utworzenie elementów konstrukcyjnych i podbudów pod fundamentami (6). Nastąpił również znaczny postęp w zakresie maszyn i materiałów w technologii cementacji, która w dalszym ciągu się rozwija. Jest na ten temat bardzo bogata literatura (7-13).

Metodę tą można stosować do gruntów wszystkich rodzajów, jednak ten rodzaj i gęstość wpływa na złożoność technologiczną procesu cementacji (9). Określenie cementacja dotyczy wtryskiwania zaczynu lub zaprawy do formacji geologicznych (14). W praktyce odpowiedni materiał do wtryskiwania, to znaczy zwykle zaczyn cementowy, wtryskiwany jest do sypkiego gruntu i zagęszczany w wyniku twardnienia zaczynu. Jest to także ekonomiczna metoda w celu poprawy terenów budowlanych (15).

Silne trzęsienie ziemi może uszkodzić budynki na terenach aktywnych sejsmicznie. Znaczne zwiększenie ruchów gruntu i przeważający okres wibracji może spowodować uszkodzenie konstrukcji. Z tego względu prace projektowe uwzględniające odporność na trzęsienie ziemi, powinny uwzględniać wpływ tych czynników dotyczących gruntów pod fundamenty w celu uniknięcia lub wyeliminowania jego skutków. Rosnące zapotrzebowanie na tereny miejskie spowodowało powszechną poprawę właściwości

1. Introduction

In last decades, a large number of buildings is being constructed on the problematic soils because of the rapid urbanization. It causes growing earthquake risks in such areas if combined with lack of engineering. Grouting is being employed to improve seismic performance of foundations. As a ground improving technique, there are a large number of potential application of grouting such as dams, tunnels, foundations, mines, levees, waterways, locks etc. (1-5). Through a wide range of applications, grouting has been used to improve the difficult soil conditions by employing densification and improving the bearing capacity and geomechanical properties of the soil. It also contributes to the water flow reducing, increasing liquefaction resistance, forming structural elements and underpinning of foundations (6). In terms of equipment and material, remarkable developments have been observed in grouting technology that is continuing and expanding. A large volume of technical literature is available for the further reading (7-13).

This method is applicable to all types of soils, but the soil type and density certainly affect the technological complexity of the process (9). The term "grouting" is used to express injecting fluid material(s) into a geological formation (14). In practice, an appropriate grout material, i.e., commonly a cement paste mixture, is injected into loose soils and densified with this material hardening. This is also a cost effective method for construction site improvement (15).

Strong earthquakes may damage buildings in earthquake prone areas. High ground motion amplification and predominant period of ground vibration can cause structure damages. Thus, earthquake resistant design plans should consider the effects of these parameters of foundation soils to avoid or minimize the consequences. Because of increased demand for redeveloping land in urban areas, it has been employed in construction applications to improve soil conditions. Over the years, the method has been practiced not only in new construction sites but also in existing building foundations.

gruntów. Przez szereg lat metoda ta była stosowana nie tylko w przypadku nowych terenów budowlanych, lecz także w już istniejących osiedlach.

Wystąpiły dwa główne zagadnienia dotyczące cementacji, a mianowicie efektywność tej metody i jej wpływ na prace projektowe. Z punktu widzenia efektywności, sejsmiczne metody były szeroko stosowane w celu oceny efektywności cementacji (16-18).

Badano szczegółowo wpływ cementacji na właściwości gruntu. Badania obejmowały szereg projektów, a mianowicie konstrukcje budowlane (19), zbiorniki (20), tunele (21), bezpieczeństwo (22), nośność gruntu i moduł sprężystości (6, 23, 24) oraz wzmocnienie struktury (27-29).

W tej pracy badano wpływ cementacji na przeważający okres vibracji gruntu i zwiększenie jego ruchliwości. Mierzono przeważający okres vibracji gruntu i szybkość fali ścinającej w przypadku niewzmacnianych gruntów oraz tych poddawanych wtryskiwaniu zaczynu, stosując mikrowstrząsy podziemne i wielokanałową analizę fal powierzchniowych. Następnie oceniano efektywność cementacji analizując zachowanie słabych fundamentów budynków w przypadku tych działań sejsmicznych.

2. Materiały i metody

Można przewidywać, że właściwości gruntów, na których zbudowano domy przed wprowadzeniem nowych, tureckich przepisów budowlanych, nie zostały zbadane w takim zakresie jak to zawarto w przepisach. Ponadto rozrost miast spowodował przejście pod budowę otaczających terenów o problematycznej jakości gruntu, praktycznie we wszystkich częściach Turcji. To zagadnienie przyczyniło się do zwiększenia słabych sejsmicznie budynków w Turcji. Z tego względu konieczna jest działalność obejmująca wzmocnienie fundamentów szeregu domów (6).

Praca objęła grunty, na których jest położonych siedem domów, a mianowicie w porządku alfabetycznym: Akdere [1], Arif Yalinkaya [2], Hurriyet [3], Karabortlen [4], Merkez [5], Nuri Erikoglu [6] i Ortaca [7]. W budynkach tych stosowano żelbet, ściany z cegły i żelbetowe ławy fundamentowe. Budynki są trzy lub czteropiętrowe z piwnicą. Akdere ma tylko dwa piętra, bez piwnicy. Budowle te są zlokalizowane na południowym zachodzie Turcji, który jest bardzo aktywny sejsmicznie (rysunek 1). Wszystkie objęte badaniami budynki, jak wiele innych zbudowanych przed rokiem 1997 miały niedostateczny nadzór inżynierski. Wody gruntowe mają poziom mniejszy od dziesięciu metrów, z wyjątkiem Akdere, w którym wody gruntowe są poniżej dwudziestu metrów [tablica 1].

Wszystkie grunty pod badanymi fundamentami tych budynków raczej nie spełniają wymagań przepisów budowlanych i wymagają wzmocnienia w przypadku ruchów sejsmicznych. W badanych przypadkach wtryskiwano zaczyn cementowy do gruntu pod fundamentami. Zaczyn w większości przypadków miał stosunek w/c = 1:3, a z rzadka inny, na przykład 2:3 lub 1:1. Dodawano także bentonit do zaczynu w ilości 5%. Cementacja obejmowała zakres

Two major problems concerning grouting are arising; namely effectiveness of the method and effects on engineering project parameters. In terms of effectiveness seismic methods are widely being used to assess the effectiveness of grouting (16-18).

Grouting effects on soil parameters were studied in details. They cover several engineering projects; hydraulic structures (19), reservoirs (20), tunnels (21), lifelines (22), bearing capacity and elastic modulus (6, 23, 24), liquefaction (25, 26) and structure strengthening (27-29).

In this study, cement grouting effects on predominant period of ground vibration and ground motion amplification of existing building foundations have been examined. Predominant period of ground vibration and shear wave velocity have been measured both on natural and grouted soils by using microtremor and multi-channel analysis of surface waves (MASW). Then the effectiveness of the grouting has been assessed by analysing the seismic performances of the weak building foundations.

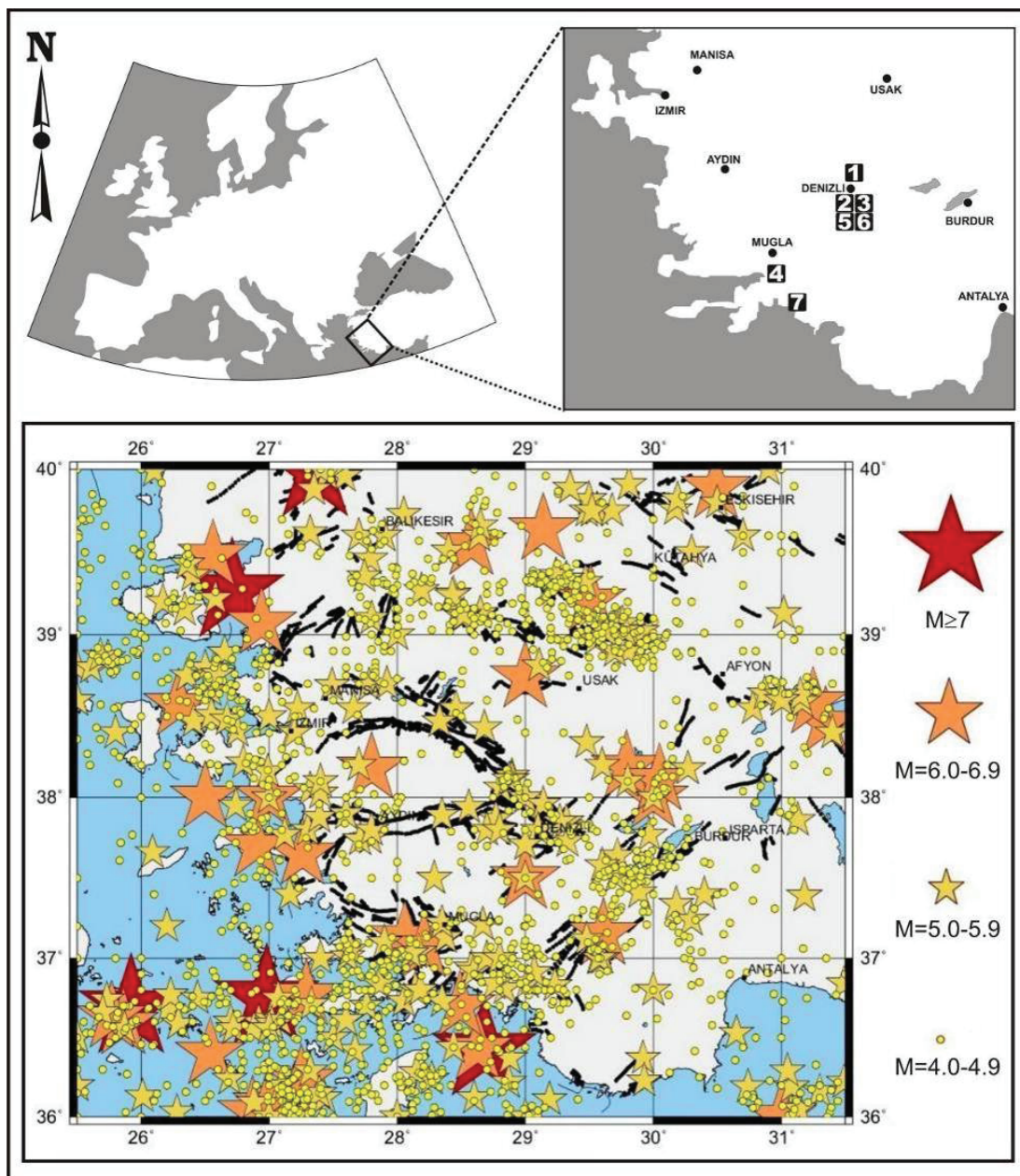
2. Materials and methods

Predictably, the soil conditions surrounding the buildings that were constructed before the introduction of new Turkish Building Codes have not been considered in virtually all of the study cases. In addition, unrestrained urban growth has increased, which has resulted in the increased instances of encountering problematic ground conditions practically in every part of the country. These phenomena have contributed to the increase in the number of seismically weak buildings in Turkey. As such, action is required to strengthen the foundations of numerous buildings (6).

The study was conducted in seven public buildings namely in alphabetical order Akdere [1], Arif Yalinkaya [2], Hurriyet [3], Karabortlen [4], Merkez [5], Nuri Erikoglu [6] and Ortaca [7]. The inspected buildings are of reinforced concrete with brickwalls and strip foundations. They have three-four storeys and basement. Akdere has only two storeys; without basement. The sites are located in southwest Turkey where seismic activity is very high (Fig. 1). All the studied buildings, like many other constructed before year 1997, had insufficient engineering supervision. Underground water level is less than ten meters in all cases, except the Akdere where underground water is absent till twenty meters (Table 1).

All soils of tested building foundations could not satisfy the building codes and they were needed strengthening against seismic effect. In the studied cases, cement paste was injected into the foundation soil. It was a 1:3 ratio in most instances and rarely in other proportions (i.e., 2:3 and 1:1). Bentonite was also added to the paste, less than 5%. The grouting was applied from bottom to top, pressure increment was equal to 25 kPa/m (Table 2). The injection boreholes reached up to six meters from the bottom of the basement levels.

In the tested sites, predominant period of ground vibration and shear wave speed [V_{s30}] have been measured both on natural and



Rys. 1. Mapa położenia terenów badań oraz sejsmicznej aktywności w południowo-zachodniej Turcji [aktywność sejsmiczna według (30)]

Fig. 1. Location map of the study and seismic activity in SW Turkey [seismic activity map from (30)]

od dna do szczytu, przy czym ciśnienie wtryskiwania zaczyna rosnąć 25 kPa/m [tablica 2]. Otwory do wtryskiwania miały do sześciu metrów głębokości, poniżej poziomu piwnicy.

Badano przeważający okres wibracji gruntu i szybkość fali ścinającej [V_{s30}] w przypadku gruntu nie poddanego cementacji i po cementacji, przy zastosowaniu mikrowstrząsów podziemnych oraz wielokanałowej analizy fal powierzchniowych.

Mikrowstrząsy podziemne miały małą amplitudę 0,1-1 μ m i okres wibracji gruntu od 0,05 do 2,0 s, spowodowane naturalnymi i sztucznymi zaburzeniami. Jest ścisła zależność pomiędzy podstawowymi właściwościami dynamicznymi gruntu i rodzajem mikrowstrząsów podziemnych. W związku z tym ich obserwacja może być źródłem ważnych informacji o dynamicznych właściwościach terenu takich jak przeważający okres wibracji gruntu

grouted soils by using microtremor and multi-channel analysis of wave surfaces.

Microtremor is of low amplitude (0.1-1.0 micrometres) and periods (0.05-2.0 seconds) vibration of the ground caused by natural or artificial disturbances. There is a close relation between the fundamental dynamic soil behaviour and the nature of microtremors. Therefore, microtremor observations can supply useful information on dynamic properties of the site such as predominant period and amplitude (31). This technique can help to estimate the effect of ground motion characteristics due to earthquake. After pioneering studies of Kanai and Tanaka (31), this method has been used widely for geotechnical purposes.

H/V spectrum method of Nakamura (32) proves that the shape of Fourier spectrum of a vertical motion is similar in between ground

Tablica 1 / Table 1

BUDYNKI OBJĘTE DOŚWIADCZENIAMI I ICH LOKALIZACJA
THE INSPECTED BUILDINGS AND SOME SITE CHARACTERISTICS

Teren Site	Nr No	Położenie Location	Rodzaj gruntu* Soil type*	Poziom wód gruntowych, m Underground water depth, m	Ilość pięter Storey
Akdere	1	Denizli-Północ Denizli-North	SW	Brak None	2
Arif Yalinkaya	2	Denizli-Centrum Denizli-Center	SW	3	Basement+3
Hurriyet	3	Denizli-Centrum Denizli-Center	SP	2.5	Basement+4
Karabortlen	4	Mugla-Ula	SP	8	Basement+3
Merkez	5	Denizli-Centrum Denizli-Center	SP	2.5	Basement+3
Nuri Erikoglu	6	Denizli-Centrum Denizli-Center	SW	2	Basement+4
Ortaca MYO	7	Mugla-Ortaca	GW	1.5	Basement+3

*SW – piasek o ciągłym uziarnieniu/well graded sand, SP – piasek o uziarnieniu nieciągłym/poor graded sand, GW – żwir o uziarnieniu ciągłym/well graded gravel

i jego amplituda (31). Ta metoda może pomóc w ocenie działania ruchów gruntu, wywołanych trzęsieniem ziemi. Po pionierskich badaniach Kanai i Tanaki (31) metoda ta jest szeroko stosowana w geotechnice.

Metoda badania widma H/V* opracowana przez Nakamurę (32) wykazuje, że kształt widma fourierowskiego amplitudy pionowej szumu otoczenia jest podobny do drgań w przypadku ruchów (drgań) gruntu po powierzchni podłoża skalnego. Jednak ruch poziomy (drgania poziome) jest badany przy dużym wzmocnieniu [rysunek 2]. Stosunek wzmocnienia [AR] można wyrazić następująco:

AR = stosunek widma ruchu poziomego na powierzchni do widma ruchu poziomego na podłożu skalnym

lub

AR = stosunek widma ruchu poziomego na powierzchni do widma pionowych ruchów na powierzchni

Zapisy mikrowstrząsów podziemnych zostały zebrane w modelu Guralp CMG-6TD-1. Jest to cyfrowy, trójosiowy sejsmometr składający się z trzech czujników w szczelnej kasecie, który może mierzyć równocześnie składowe ruchów ziemi w układzie północ/południe, wschód/zachód i pionowe. Czułość każdego czujnika na drgania ziemi jest duża i obejmuje zakres od 0,033 do 50 Hz.

Stosowano z powodzeniem kanał multiplekserowy do pomiaru szybkości powierzchniowych fal ścinających – S. Zarys szybkości fali – S może być oszacowany na podstawie zasady pomiarów fal Rayleigha trójstopniową metodą: pozyskiwanie licznych zapisów uzyskanych w kanale multipleksowym wzdłuż liniowego przeglądu z zastosowaniem metody wzdłużnych profili, wydzielenie krzywych rozproszonych fal Rayleigha i zastosowanie odwzorowania odwrotnego tych krzywych rozproszonych przy profilu szybkości

*stosunek amplitudy drgań poziomych do pionowych

Tablica 2 / Table 2

CIŚNIENIE WTRYSKIWANIA W OTWORACH
INJECTION PRESSURES IN BOREHOLES

Poziom wtryskiwania Injection level, m	Ciśnienie cementacji Grouting pressure, kPa
0.00–1.00	25
1.00–2.00	50
2.00–3.00	75
3.00–4.00	100
4.00–5.00	125
5.00–6.00	150

surface and base rock. However the horizontal motion is experienced with a major amplification [Fig. 2]. Amplification ratio [AR] can be expressed as follows:

AR=Spectrum of horizontal motion on surface/Spectrum of horizontal motion of base rock

or

AR=Spectrum of horizontal motion on surface/Spectrum of vertical motion on surface

The microtremor records have been collected by Guralp CMG-6TD-1 model. It is a digital three-axis seismometer consisting of three sensors in a sealed case, which can measure the north/south, east/west and vertical components of ground motion simultaneously. Each sensor is sensitive to ground vibrations over a wide frequency range (0.033 – 50 Hz).

Multi-channel analysis of surface waves has been successfully used to determine near surface shear wave velocity. S-wave velocity profile can be evaluated from Rayleigh wave measurements in a three-step process: acquisition of a multiple number of multi-

fali S dla każdej wystrzelonej porcji (34). W tej pracy szybkości fal S rejestrowano za pomocą sejsmografu WZG-12A. Ma on 12 kanałów, pobieranie danych z szybkością 24 bitów AD (od 10 μ s do 200 ms) i wzmacniacz środkowo-przepustowy o zakresie od 0,1 Hz do około 4000 Hz.

Wzmocnienie gruntu jest także ważnym czynnikiem przy sprawdzaniu projektów sejsmicznych. Naukowcy zaproponowali pewne korelacje łączące szybkość fali ścinającej i czynnik wzmocnienia gruntu (35-37). Równanie zaproponowane przez Midorikawę (35) ($A = 68 \cdot V_{s_{30}}^{-0.6}$) stosowano do obliczenia stosunku wzmocnienia.

3. Wyniki pomiarów

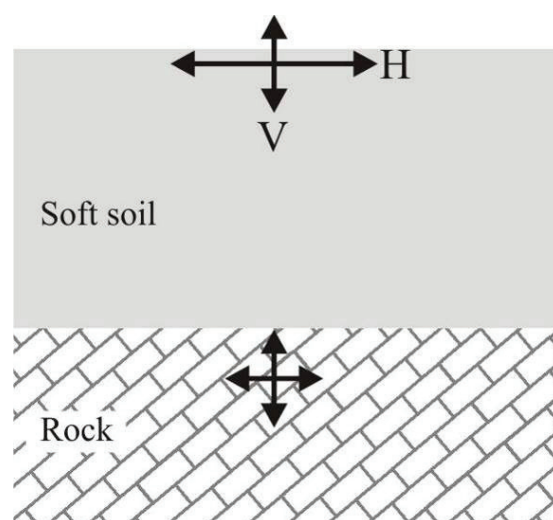
Częstotliwość drgań naturalnego gruntu jest w zakresie od 1,49 do 2,80 Hz, a przeważający okres drgań tych gruntów wynosi od 0,35 do 0,67 s. Największe i najmniejsze przeważające okresy drgań gruntów zmierzono w Akdere, Arif Yalinkaya i Karabortlen [tablica 3]. Na rysunku 3 przedstawiono skuteczność wpływu cementacji na przeważający okres drgań gruntu. Częstotliwość i okresy drgań gruntu po cementacji uległy następującym przesunięciom: 2,18-5,55 Hz i 0,12-0,30 s. Te dane potwierdzają, że cementacja zmniejszyła przeważający okres nawet o 57%, a średnia dla wszystkich terenów wynosi 38,1%.

Szybkość fali ścinającej w gruntach po cementacji waha się od 393 m/s do 575 m/s, a przed cementacją były w przedziale od 275 m/s do 448 m/s. Te wyniki potwierdzają, że wielkości $V_{s_{30}}$ zwiększyły się znacznie w wielu przypadkach [rysunek 4]. Ta poprawa jest oczywista w Hurriyet, Akdere, Merkez, i Ortaca, w których wzrost wynosi odpowiednio 50%, 33%, 23% i 19%. Cementacja spowodowała mniejszy wzrost w Nuri Erikoglu [14%], Karabortlen [9%] i Arif Yalinkaya [5%] [Tablica 4]. Średnia szybkość fali ścinającej w gruntach wzrosła z 374 m/s do 449 m/s, a więc wzrost wyniósł około 20%.

W tablicy 4 podano obliczony współczynnik wzmocnienia dla naturalnych gruntów i po cementacji. Największy i najmniejszy współczynnik wzmocnienia wynosi 1,66-2,33 w przypadku naturalnych gruntów i 1,50-1,88 po cementacji. Na rysunku 5 pokazano wpływ cementacji na współczynnik wzmocnienia gruntów dotyczący przeważającego okresu drgań. Poprawa wynosi od 3% do 16%, średnio 11% dla wszystkich badanych terenów.

4. Dyskusja i wnioski

Cementacja objęła słabe sejsmicznie budynki, które zostały wykonane ze zbrojonego betonu, ściany z cegły, a ławy fundamentowe z żelbetu. Zostały one zbudowane na podłożu SW, SP i GW z wysokim poziomem wód gruntowych. Fundamenty tych budynków nie spełniały wymagań tureckich przepisów budowlanych i przeprowadzono wzmocnienie gruntów, stosowane na terenach sejsmicznie aktywnych. Do cementacji zastosowano zaczyn cementowy o stosunku w/c = 1:3, w większości przypadków



Rys. 2. Zasady metody widma (33)

Fig. 2. Principle of H/V spectrum method (33)

channel records along a linear survey line by use of the roll-along mode, extraction of dispersion curves of Rayleigh waves, and inversion of dispersion curves for an S wave velocity profile for each shot gather (34). In this study, S wave velocity data have been recorded by WZG-12A engineering seismograph. It has 12 channels, 24-bit A/D sampling rate (between 10 μ s and 200 ms) and 0.1Hz~4000 Hz band-pass width.

Soil amplification is also an essential parameter for a seismic proof design. The researchers have suggested some correlations between shear wave velocity and soil amplification factor (35-37). The equation, suggested by Midorikawa (35) ($A=68 \cdot V_{s_{30}}^{-0.6}$), has been employed here to calculate the amplification ratio.

3. Results of measurements

The frequencies of natural ground ranged between 1.49 and 2.80 Hz and the predominant periods of these soils varied between 0.35 s and 0.67 seconds. The lowest and the highest predominant periods were measured in Akdere site and Arif Yalinkaya and Karabortlen sites, respectively [Table 3]. Fig. 3 shows the effectiveness of grouting on the predominant period of ground vibration. The frequencies and the periods of grouted soils have moved to 2.18-5.55 Hz and 0.12-0.30 seconds, respectively. The data proved that grouting has reduced the period up to 57% and the average for all sites was 38.1%.

The shear wave velocities of the grouted soils vary between 393 m/s and 575 m/s and they were differing in the range from 275 m/s to 484 m/s before. These data are proofing that the $V_{s_{30}}$ values have significantly increased in many cases [Fig. 4]. This improvement is evident at Hurriyet, Akdere, Merkez, and Ortaca sites, where the averages of increment are 50%, 33%, 23% and 19%, respectively. The grouting has caused lower increase at Nuri Erikoglu [14%], Karabortlen [9%] and Arif Yalinkaya [5%] sites [Table 4]. The average shear wave velocity of ground is increased from 374 m/s to 449 m/s and the increase is about 20%.

Tablica 3 / Table 3

ZAREJESTROWANE MIKROWSTRZĄSY PODZIEMNE I PRZEWAŻAJĄCE OKRESY DRGAŃ GRUNTÓW

THE RECORDED MICROTREMOR DATA AND GROUND PERIODS

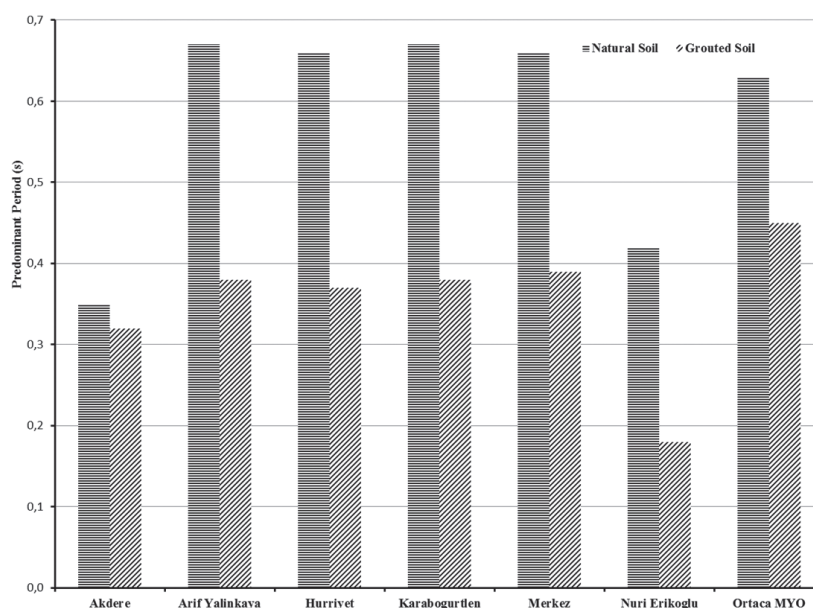
Teren Site	Teren naturalny / Natural soil		Teren po cementacji / Grouted soil	
	Częstotliwość / Frequency f, Hz	Okres / Period T0=1/f, s	Częstotliwość / Frequency F, Hz	Okres / Period T0=1/f, s
Akdere	2.80	0.35	3.10	0.21
Arif Yalinkaya	1.49	0.67	2.62	0.25
Hurriyet	1.50	0.66	2.64	0.24
Karabortlen	1.57	0.63	2.18	0.30
Merkez	1.49	0.67	2.60	0.25
Nuri Erikoglu	1.50	0.66	2.51	0.26
Ortaca MYO	2.38	0.42	5.55	0.12

cementacja objęła całą głębokość otworów wywierconych do tego celu, przy czym wzrost ciśnienia wynosił 25 kPa/m.

Skuteczność cementacji oceniono na podstawie częstotliwości i przeważających okresów drgań gruntów, przy czym średnie z tych ostatnich zmniejszyły się z 0,58 do 0,23 co wykazuje poprawę po cementacji. Ogólnie można stwierdzić, że ten okres w budynkach z żelbetu wynosi 0,1 s na jedno piętro. Spodziewane okresy w budynkach objętych badaniami powinny wynosić 0,5-0,6 s z wyjątkiem pierwszego budynku. W świetle tych danych, zjawiska rezonansu trzeba oczekiwać w większości przypadków, jeżeli nie zastosuje się cementacji. Średnia szybkość fal ścinających wzrosła z 374 m/s do 449 m/s. Podobnie średni współczynnik wzmocnienia gruntów uległ korzystnemu zmniejszeniu z 1,97 do 1,75. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowana cementacja będzie efektywna w zmniejszeniu ryzyka sejsmicznego.

Przeważające okresy naturalnego gruntu zawarte są pomiędzy 0,35 i 0,67 sekund, a po cementacji uległy zmniejszeniu do 0,12 s minimalne i 0,30 s maksymalne. Tak więc okresy te zmalały dramatycznie, maksymalnie o 57% a średni spadek dla wszystkich terenów wyniósł około 38%. Szybkości faz ścinających gruntów po cementacji są zawarte w przedziale od 393 m/s [najmniejsze] do 575 m/s [największe], a przed cementacją wynosiły od 275 m/s do 484 m/s. Wyniki te pokazują, że V_{s30} wzrosła znacznie w większości przypadków nawet o 50%. Średnia szybkość fal ścinających w gruncie uległa zwiększeniu z 374 m/s do 449 m/s, a więc poprawa wyniosła około 20%. Maksymalny i minimalny współczynnik wzmocnienia gruntu w przypadku naturalnego gruntu i po cementacji wynosi odpowiednio od 1,66 do 2,33 i 1,50 do 1,88. Wykazuje to, że poprawa wynosi od 3% do 16% a średnio 11%.

Wyniki pokazują, że cementacja znacznie poprawiła sejsmiczną odporność fundamentów. Metodę tę można więc polecać w celu ograniczenia ryzyka uszkodzeń sejsmicznych konstrukcji.



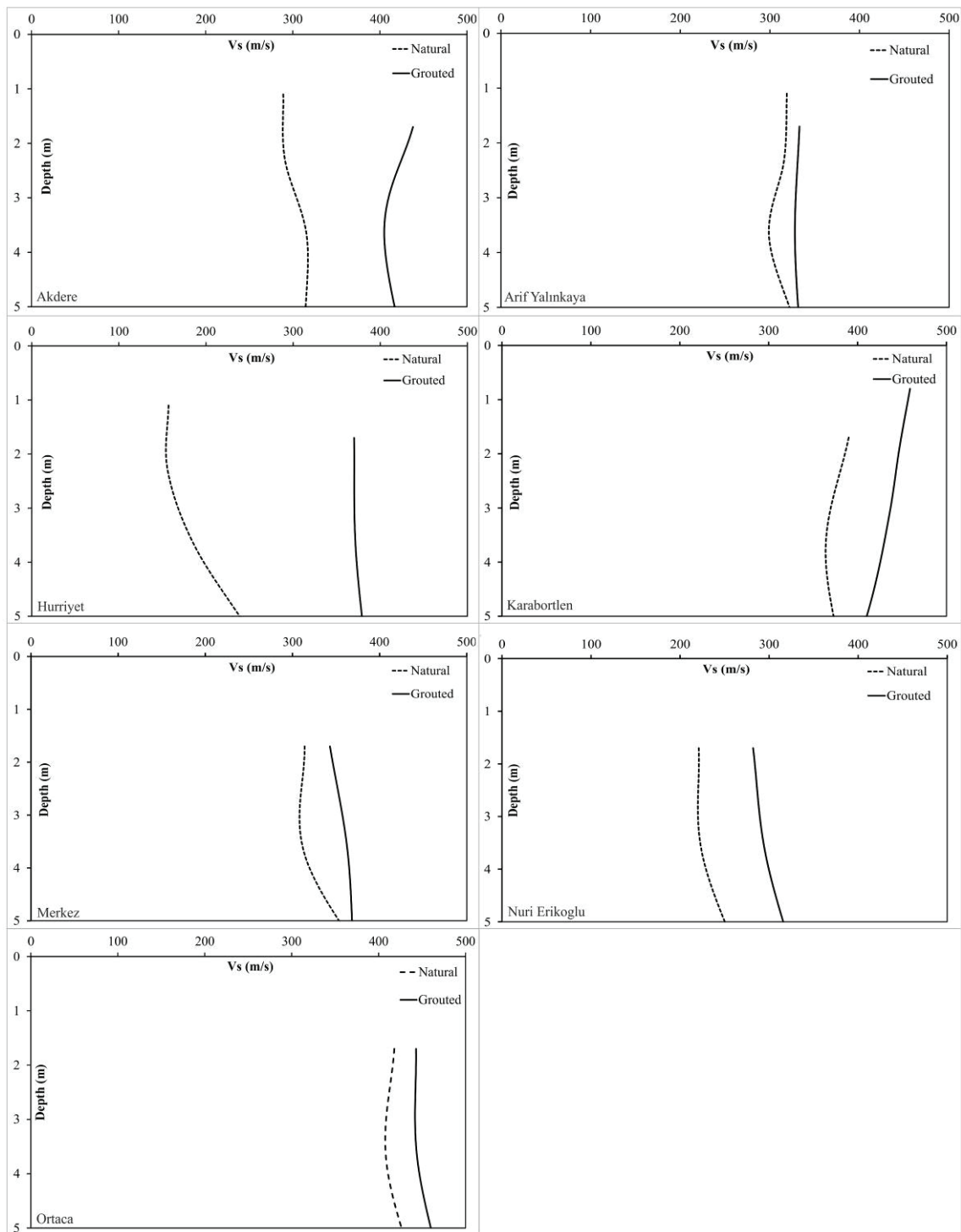
Rys. 3. Zmiany przeważającego okresu drgań gruntów po cementacji

Fig. 3. The modification of predominant period of ground vibration after grouting

Table 4 gives the calculated amplification factors of natural and grouted ground. The minimum and the maximum ratios of the natural and the grouted ground are 1.66-2.33 and 1.50-1.88, respectively. Fig. 5 shows the diagram of the grouting effects on the amplification factor. The improvement varies between 3% and 16% with an average of 11% for all sites.

4. Discussion and conclusions

Cement grouting has been conducted at the seismically weak existing buildings which are constructed of reinforced concrete with brickwalls and strip foundations. The buildings were built on SW, SP and GW soils with high ground water level. The tested building foundations did not satisfy the codes and the ground was strengthened against seismic forces by grouting. In grouting practice, cement paste was injected, which has w/c ratio of 1:3, in most instances. The grouting was applied from bottom to top,



Rys. 4. Wpływ cementacji na szybkość fali ścinającej w funkcji głębokości

Fig. 4. Effect of grouting on shear wave velocity with depth

Podziękowania

Autorzy składają podziękowanie Uniwersytetowi w Pamukkale za pomoc finansową w ramach projektu nr: 2011FBE048.

Literatura / References

1. U.S. Army, Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities. U.S. Army Corps of Engineers, ETL 1110-1-185, Washington 2003.
2. T. D. Stark, P. J. Axtell, J. R. Lewis, J. C. Dillon, W. B. Empson, J. E. Topi, F. C. Walberg, Soil inclusions in jet grout columns. DFI Journal, **3**, 1, 33-44 (2009).

and pressure increments was 25 kPa/m. The injection boreholes reached up to six meters from the bottom of the basement levels.

Tested effectiveness of grouting namely the frequencies and predominant periods of ground has shown that the average shifted from 0.58 to 0.23 as the effect of grouting. Generally speaking, period of concrete reinforced buildings is about 0.1 second/storey. The expected periods of the tested buildings should be around 0.5-0.6 s except the first one. In the light of these data, resonance phenomena would be expected in the majority of cases if the grouting would not be practised. The average of shear wave velocities

Teren/Site	Vs ₃₀ , m/s		Współczynnik wzmocnienia / Amplification ratio	
	Grunt naturalny Natural ground	Grunt po cementacji Grouted ground	Grunt naturalny Natural ground	Grunt po cementacji Grouted ground
Akdere	336	447	2.07	1.74
Arif Yalinkaya	373	393	1.94	1.88
Hurriyet	275	414	2.33	1.82
Karabortlen	475	518	1.68	1.59
Merkez	322	397	2.12	1.87
Nuri Erikoglu	350	401	2.02	1.86
Ortaca MYO	484	575	1.66	1.50

3. H. Seo, K. Jeong, H. Choi, I. Lee, Pullout resistance increase of soil nailing induced by pressurized grouting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**, 5, 604–613 (2012).

4. H. Shimada, A. Hamanaka, T. Sasaoka, K. Matsui, Behaviour of grouting material used for floor reinforcement in underground mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, <http://dx.doi.org/10.1080/17480930.2013.804257>, 2013, 1-16.

5. S. Li, W. Zhao, Y. Huang, Y. Lei, L. Yu, Study on the characteristics of grout permeation based on cylindrical diffusion. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, **19**, 1, 57-62 (2013).

6. E. Akyol, Strengthening foundations of seismically weak buildings on sandy soils in Denizli, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, **66**, 5, 1415-1421 (2012).

7. B. Indraratna, J. Chu, *Ground Improvement: Case Histories*. Elsevier, Amsterdam 2005.

8. M. P. Moseley, K. Kirsch, *Ground Improvement*. Spon Press, New York 2004.

9. J. Warner, *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures*. John Wiley & Sons, New Jersey 2004.

10. H. I. Ling, D. Leshcinsky, F. Tatsuoka, *Reinforced Soil Engineering: Advances in Research and Practice*. Marcel Dekker, New York 2003.

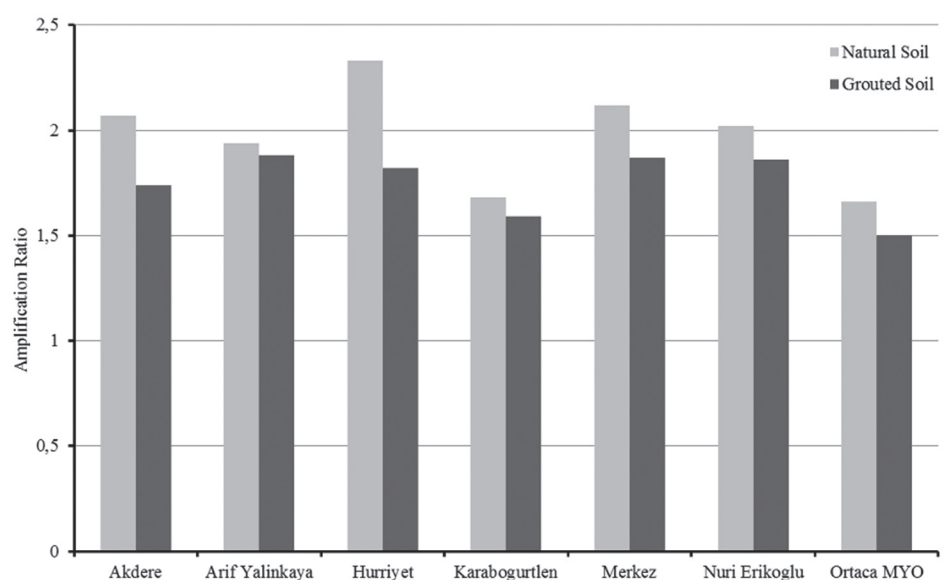
11. D. Harrison, *The Grouting Handbook: A Step-by-Step Guide to Heavy Equipment Grouting*. Gulf Publishing, Houston 2000.

12. A. Fransson, M. Zetterlund, G. Gustafson, J. Funehag, L. Hernqvist, C. Butrön, A Swedish grouting design concept: hydraulic testing and selection of grout. In: L. F. Johnsen, D. A. Bruce, M. J. Byle, (Eds.), *Grouting and Deep Mixing*, 1691-1700, ASCE 2012.

13. Z. F. Wang, S. L. Shen, C. E. Ho, Y. H. Kim, Jet grouting practice: an overview. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, **44**, 4, 88-96 (2013).

14. Byle M. J., Borden R. H., *Verification of Geotechnical Grouting (A Report from the ASCE Committee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division)*. Geotechnical Special Publication No: 57, American Society of Civil Engineers, San Diego (1995).

15. P. M. Gallagher, *Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blackburg 2000.



Rys. 5. Wpływ cementacji na współczynnik wzmocnienia

Fig. 5. The effect of grouting on ground amplification factor

had risen from 374 m/s to 449 m/s. Similarly, the average ground amplification factor has been improved from 1.97 to 1.75. The results suggest that the employed practise is effective to mitigate seismic hazards.

The predominant periods of the natural soils varied between 0.35 s and 0.67 seconds and after grouting it has fall to 0.12 second [min.] and 0.30 second [max]. The periods have dramatically dropped to maximum 57% and the average decrease of the sites is about 38%. The shear wave velocities of the grouted ground varied between 393 m/s [min.] and 575 m/s [max] and they were differing between 275 m/s [min.] and 484 m/s [max] before grouting. The results showed that the Vs₃₀ values have significantly increased in many cases and reached up to 50%. The average shear wave velocities of ground is shifted from 374 m/s to 449 m/s and the improvement is about 20%. The minimum and the maximum ground amplification factor of the natural and the grouted soils are 1.66-2.33 and 1.50-1.88, respectively. The data showed that the development varied between 3% and 16%, with an average of 11%.

16. N. Turk, W. R. Dearman, Assessment of grouting efficiency in a rock mass in terms of seismic velocities. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 36, 1, 101-108 (1987).
17. G. Fallon, B. Zhou, A. King, P. Hatherly, Geophysical Assessment of Fracture Grouting. Australian Coal Association Program (ACARP) Report, Project No: C11056, Brisbane 2004.
18. USDP, Geophysical Grouting Control Systems. U.S. Department of Transportation, Report No: DOT/RSPA/DMA-50/83/2, Washington (1983).
19. A. Hashad, Y. El-Hakem, A. El-Ashaal, Improving seismic resistance of hydraulic structures using soil improvement techniques. Sixteenth International Water Technology Conference, Istanbul, Turkey, 7-10 May 2012.
20. K. Suzuki, T. Oyama, F. Kawashima, T. Tsukada, A. Jyomori, Monitoring of grout material injected under a reservoir using electrical and electromagnetic surveys. *Exploration Geophysics*, 41, 1, 69-79 (2009).
21. Z. Y. Yang, H. W. Huang, J. Yue, Research on impact of grouting material on seismic performance of tunnel in soft soil. *Advanced Materials Research*, 160-162, 1056-1061 (2010).
22. R. D. Andrus, R. M. Chung, Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines. National Institute of Standards and Technology Report, NISTIR 5714, Gaithersburg, MD 1995.
23. P. Dayakar, K. V. Raman, K. V. B. Raju, Study on permeation grouting using cement grout in sandy soil. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 4, 4, 5-10 (2012).
24. G. Modoni, J. Bzowka, Analysis of foundations reinforced with jet grouting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, 12, 1442-1454 (2012).
25. B. Ozsoy, T. Durgunoglu, The mitigation of liquefaction by means of high modulus soilcrete columns. Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 26-30 May 2003.
26. M. H. Maher, K. S. Ro, J. P. Welsh, Cyclic undrained behaviour and liquefaction potential of sand treated with chemical grouts and microfine cement (MC-500). *Geotechnical Testing Journal*, 17, 2, 159-170 (1994).
27. FEMA, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Pub. No: 273, Washington D.C. 1997.
28. CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Ref. No. prEN 1998-1:2003 E, Brussels 2003.
29. M. Heidarzadeh, A. A. Mirghasemi, F. Eslamian, S. M. Sadr-Lahijani, Application of cement grouting for stabilization of coarse materials. *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering*, 11, 1, 71-77 (2013).
30. KOERI, Earthquake Maps, 2012, <http://www.koeri.boun.edu.tr/>
31. K. Kanai, T. Tanaka, On microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39, 97-114, University of Tokyo 1961.
32. Y. Nakamura, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12th World Conf. Earthq. Eng., Auckland, New Zealand, 30 January- 4 February 2000.
33. I. Towhata, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer, Berlin 2008.
34. Y. Luo, J. Xia, J. Liu, Y. Xu, Q. Liu, Research on the middle-of-receiver-spread assumption of the MASW method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1, 71-79 (2009).
35. S. Midorikawa, Prediction of isoseismal map in the Kanto plain due to hypothetical earthquake. *Journal of Structural Engineering*, 33B, 43-48 (1987).
36. R. Borcherdt, C. M. Wentworth, A. Janssen, T. Fumal, J. Gibbs, Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay region, CA. 4th Int. Conf. Seismic Zonation, Stanford, USA, 26-30 August, 1991.
37. W. B. Joyner, T. E. Fumal, Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion. 8th World Conf. on Earthquake Eng., San Francisco, USA, 18-22 May, 1984.

The results suggested that the grouting was very effective in improving the seismic performance of foundations. The method is strongly advised to mitigate the seismic risks of structures.

Acknowledgement

The authors thank to the Scientific Research Projects (BAP) Unit of Pamukkale University for the financial support. Project No: 2011FBE048.